

# **Document made available under the Patent Cooperation Treaty (PCT)**

International application number: PCT/EP05/002973

International filing date: 21 March 2005 (21.03.2005)

Document type: Certified copy of priority document

Document details: Country/Office: DE  
Number: 10 2004 014 677.2  
Filing date: 25 March 2004 (25.03.2004)

Date of receipt at the International Bureau: 27 May 2005 (27.05.2005)

Remark: Priority document submitted or transmitted to the International Bureau in compliance with Rule 17.1(a) or (b)



World Intellectual Property Organization (WIPO) - Geneva, Switzerland  
Organisation Mondiale de la Propriété Intellectuelle (OMPI) - Genève, Suisse

06.05.2005

**BUNDESREPUBLIK DEUTSCHLAND****Prioritätsbescheinigung über die Einreichung  
einer Patentanmeldung**

**Aktenzeichen:** 10 2004 014 677.2  
**Anmeldetag:** 25. März 2004  
**Anmelder/Inhaber:** BASF Aktiengesellschaft,  
67063 Ludwigshafen/DE  
**Bezeichnung:** Wirbelschichtverfahren und Reaktor zur Durch-  
führung exothermer chemischer Gleichgewichts-  
reaktionen  
**IPC:** B 01 J, C 01 B

**Die angehefteten Stücke sind eine richtige und genaue Wiedergabe der ur-  
sprünglichen Unterlagen dieser Patentanmeldung.**

München, den 28. April 2005  
**Deutsches Patent- und Markenamt**  
**Der Präsident**

Im Auftrag

A handwritten signature in black ink, which appears to read "Faust".

Faust

Wirbelschichtverfahren und Reaktor zur Durchführung exothermer chemischer Gleichgewichtsreaktionen

Beschreibung

5

Die Erfindung betrifft ein Verfahren zur Durchführung exothermer chemischer Gleichgewichtsreaktionen in einem Wirbelschichtreaktor. Weiterhin betrifft die Erfindung einen Wirbelschichtreaktor zur Durchführung des Verfahrens.

10

Ein Beispiel für eine exotherme chemische Gleichgewichtsreaktion ist der 1868 von Deacon entwickelte Prozess der katalytischen Chlorwasserstoffoxidation mit Sauerstoff zu Chlor.

15

Durch Überführung von Chlorwasserstoff in Chlor kann die Chlorherstellung von der Natronlaugeherstellung durch Chloralkalielektrolyse entkoppelt werden. Eine solche Entkopplung ist attraktiv, da weltweit der Chlorbedarf stärker als die Nachfrage nach Natronlauge wächst. Zudem fällt Chlorwasserstoff in großen Mengen beispielsweise bei Phosgenierungsreaktionen, etwa bei der Isocyanatherstellung, als Koppelprodukt an. Der bei der Isocyanatherstellung gebildete Chlorwasserstoff wird überwiegend in der Oxichlorierung von Ethylen zu 1,2-Dichlorethan eingesetzt, das zu Vinylchlorid und schließlich zu PVC weiterverarbeitet wird. Durch den Deacon-Prozess wird somit auch eine Entkopplung von Isocyanat-Herstellung und Vinylchlorid-Herstellung ermöglicht.

20

25

Bei der Deacon-Reaktion verschiebt sich die Lage des Gleichgewichts mit zunehmender Temperatur zu Ungunsten des gewünschten Endproduktes. Es ist daher vorteilhaft, Katalysatoren mit möglichst hoher Aktivität einzusetzen, die die Reaktion bei niedriger Temperatur ablaufen lassen.

30

Als Katalysatoren zur Durchführung der Deacon-Reaktion eignen sich zum Beispiel Rutheniumverbindungen auf Trägermaterialien, wie sie in GB 1,046,313, DE-A 197 48 299 oder DE-A 197 34 412 beschrieben sind.

Weiterhin geeignet sind Katalysatoren auf der Basis von Chromoxid, wie sie zum Beispiel aus US 4,828,815 bekannt sind.

35

Der Einsatz eines Wirbelschichtreaktors zur Durchführung der Deacon-Reaktion unter Verwendung von geträgerten Kupferverbindungen als Katalysator ist beschrieben in J.T. Quant et al., The Shell Chlorine Process, erschienen in The Chemical Engineer, July/August 1963, Seiten CE 224 bis CE 232.

40

S. Furusaki, Catalytic Oxidation of Hydrogen Chloride in a Fluid Bed Reactor, AIChE Journal, Vol. 19, No. 5, 1973, Seiten 1009 bis 1016 beschreibt ebenfalls die Verwendung eines Wirbelschichtreaktors zur Durchführung der Deacon-Reaktion. Der hier eingesetzte Katalysator ist eine Mischung aus CuCl<sub>2</sub>, KCl und SnCl<sub>2</sub>.

5

Wirbelschichtverfahren werden gewöhnlich eingesetzt, um eine möglichst isotherme Temperaturverteilung zu erreichen und insbesondere Hot Spots, d.h. Bereiche lokaler Überhitzung, wie sie oft in Festbettverfahren auftreten, zu vermeiden (vgl. z.B. Daizo Kunii und Octave Levenspiel, Fluidization Engineering, 2. Auflage, 1991, Seite 313).

10

Dies gilt insbesondere für exotherme Reaktionen wie die heterogen-katalysierte Gasphasenoxidation von Chlorwasserstoff zu Chlor.

Es hat sich jedoch gezeigt, dass es nicht immer vorteilhaft ist, eine solche Reaktion isotherm durchzuführen. So lässt sich z.B. beim Deacon-Verfahren die Chlorausbeute erhöhen, wenn die Reaktion zunächst bei höheren Temperaturen durchgeführt wird und die Temperatur, sobald sich der Umsatz dem Gleichgewichtsumsatz nähert, reduziert wird.

15

Aufgabe der Erfindung ist es, ein verbessertes Verfahren zur Durchführung exothermer chemischer Gleichgewichtsreaktionen in einem Wirbelschichtreaktor bereitzustellen. Insbesondere ist es Aufgabe der Erfindung, ein Verfahren mit besserer Raum-Zeit-Ausbeute, d.h. einer größeren Ausbeute bei gleichem Reaktorvolumen und gleicher Reaktionszeit wie bei den aus dem Stand der Technik bekannten Verfahren, bereitzustellen.

20

Aufgabe der Erfindung ist es, ein verbessertes Verfahren zur Durchführung exothermer chemischer Gleichgewichtsreaktionen in einem Wirbelschichtreaktor bereitzustellen. Insbesondere ist es Aufgabe der Erfindung, ein Verfahren mit besserer Raum-Zeit-Ausbeute, d.h. einer größeren Ausbeute bei gleichem Reaktorvolumen und gleicher Reaktionszeit wie bei den aus dem Stand der Technik bekannten Verfahren, bereitzustellen.

25

Es ist ebenfalls Aufgabe der Erfindung, einen Wirbelschichtreaktor bereitzustellen, in dem das Verfahren durchgeführt wird.

30

Gelöst wird die Aufgabe durch ein Verfahren zur Durchführung exothermer chemischer Gleichgewichtsreaktionen in einem Wirbelschichtreaktor, wobei im Wirbelbett des Wirbelschichtreaktors entlang der Strömungsrichtung eine Temperaturverteilung vorliegt und die Temperaturdifferenz zwischen der niedrigsten und der höchsten Temperatur mindestens 10 K beträgt.

35

Strömungsrichtung ist dabei die Richtung, in der das Gas innerhalb des Wirbelbettes von einem unterhalb des Wirbelbettes angeordneten Gasverteiler zur Oberfläche des Wirbelbettes strömt. Der Gasverteiler kann zum Beispiel ein Lochboden oder ein Boden mit darin verteilten Gasverteilerdüsen sein.

- Wirbelschichtreaktoren weisen in der Regel eine zylindrische oder näherungsweise rotationssymmetrische Geometrie auf und werden in der Regel parallel zur Rotationsachse durchströmt. In diesem Sinne ist die oben formulierte Strömungsrichtung auch als axiale Strömung zu bezeichnen und von innerhalb des Wirbelbetts lokal auftretenden, sich in Summe über die Gesamthöhe des Wirbelbetts aber weitgehend kompensierenden, radialen Strömungen zu unterscheiden.
- Vorzugsweise liegt bei dem erfindungsgemäßen Verfahren innerhalb des Wirbelbettes eine Temperaturverteilung vor, bei welcher die Temperatur von einem absoluten Temperaturmaximum (d.h. der maximalen Temperatur im gesamten Wirbelbett) entlang der Strömungsrichtung zur Oberfläche des Wirbelbettes hin abnimmt. Oberfläche bezeichnet die Fläche des Wirbelbettes, durch die das Gas aus dem Wirbelbett ausströmt.
- Ein Vorteil einer solchen Temperaturverteilung entsprechend dem erfindungsgemäßen Verfahren sind verbesserte Raum-Zeit-Ausbeuten. Tiefe Ausgangstemperaturen sind zur Erreichung eines möglichst hohen thermodynamischen Gleichgewichtsumsatzes erforderlich, während höhere Temperaturen innerhalb des Wirbelbetts aus kinetischen Gründen vorteilhaft sind.
- Ein weiterer Vorteil der zur Oberfläche des Wirbelbettes hin abnehmenden Temperatur ist, dass Katalysatorsysteme, die bei erhöhter Temperatur flüchtige Aktivkomponenten enthalten, mit besserer Langzeitstabilität betrieben werden können. Solche Katalysatorsysteme sind zum Beispiel getragerte Rutheniumverbindungen. Durch die zur Oberfläche des Wirbelbettes hin abnehmende Temperatur können flüchtige Katalysatorverbindungen von kälteren Katalysatorpartikeln im oberen Bereich des Wirbelbettes wieder eingefangen und mit diesen kontinuierlich auch wieder in untere Bereiche des Wirbelbettes zurückgeführt werden.
- Die Differenz zwischen dem Temperaturmaximum innerhalb des Wirbelbetts und der niedrigsten Temperatur, die in dem erfindungsgemäßen Verfahren an einer Position oberhalb des Temperaturmaximums, also in der Nähe der Oberfläche des Wirbelbetts herrscht, beträgt maximal 150 °C, bevorzugt maximal 100 °C und besonders bevorzugt maximal 50 °C.
- In einer besonders bevorzugten Verfahrensvariante nimmt die Temperatur entlang der Strömungsrichtung von einem absoluten Temperaturmaximum sowohl zum Gasverteiler hin als auch zur Oberfläche des Wirbelbettes hin ab. In einer ganz besonders bevorzugten Verfahrensvariante ist der Abstand des absoluten Temperaturmaximums zum Gasverteiler geringer als der Abstand des absoluten Temperaturmaximums zur Oberfläche des Wirbelbettes.

Die Reaktionsgase werden vorzugsweise mit einer Temperatur, die unterhalb der niedrigsten im Wirbelbett vorliegenden Temperatur liegt, über den Gasverteiler in das Wirbelbett eingeleitet. Bei einer exothermen Reaktion führt dies dazu, dass die Temperatur im Wirbelbett in Strömungsrichtung zunächst zunimmt, bis das absolute Temperaturmaximum erreicht ist. Damit lassen sich im erfindungsgemäßen Verfahren Wärmetauscherkapazitäten und somit Investitionskosten einsparen, denn einerseits muss so eine geringere Wärmemenge auf die Eduktgase übertragen werden und andererseits ist auch die aus dem Wirbelbett mittels im Wirbelbett eingebauter Wärmetauscher herauszuholende Wärmemenge geringer, da das kältere Eduktgas direkt im Wirbelbett einen größeren Teil der bei der exothermen Reaktion freiwerdenden Wärmemenge aufnehmen kann.

- 5
- 10
- 15
- 20
- 25
- 30
- 35
- 40

Die Temperaturverteilung im Wirbelbett wird vorzugsweise durch Wärmeübertragung an mindestens einen Wärmetauscher innerhalb des Wärmebettes gesteuert. Bei Einsatz nur eines Wärmetauschers ist dieser vorzugsweise nur in einem Teil des Wirbelbettes angeordnet. So befindet sich in einer bevorzugten Ausführungsform im unteren Teil des Wärmebettes kein Wärmetauscher, so dass keine Reaktionswärme abgeführt wird. Hieraus resultiert nach einem Temperaturanstieg aufgrund der exothermen Reaktion eine höhere Temperatur. Im oberen Teil des Wärmebettes ist dann ein Wärmetauscher angeordnet, über welchen Reaktionswärme abgeführt wird. Hierdurch lässt sich im oberen Teil des Wärmebettes eine niedrigere Temperatur einstellen.

In einer Ausführungsform ist das Wirbelbett in zwei Temperaturzonen unterteilt. Durch die Anordnung mehrerer Wärmetauschers im Wirbelbett oder durch die Anordnung eines Wärmetauschers in der Mitte des Wärmebettes lassen sich auch mehr als zwei Temperaturzonen einstellen.

In einer besonders bevorzugten Ausführungsform des Wirbelschichtreaktors beträgt der Abstand zwischen dem Gasverteilerboden und dem nächstgelegenen Wärmetauscher oberhalb des Gasverteilers mindestens 25 cm, insbesondere mindestens 50 cm. Der optimale Abstand von Gasverteiler und Wärmetauscher ist dabei abhängig von Gasbelastung, Temperatur der Eduktgase, Blasenbildungscharakteristik und Reaktionskinetik in Abhängigkeit von den verwendeten Katalysatoren. Typischerweise ist ein Abstand von mindestens 25 cm erforderlich, um eine entsprechend ansteigende Temperatur zwischen dem Gasverteilerboden und dem Wärmetauscher zu erreichen. Es ist aber auch umgekehrt eine zu starke Temperaturerhöhung und damit einhergehend eine zu große Differenz zwischen dem absoluten Temperaturmaximum und der niedrigsten Temperatur an einer Position oberhalb des Temperaturmaximums zu vermeiden. In der Regel sollte der Abstand zwischen dem Gasverteilerboden und dem Wär-

metauscher deshalb nicht mehr als 10 m, bevorzugt nicht mehr als 6 m und insbesondere nicht mehr als 3 m betragen. In einer ganz besonders bevorzugten Ausführungsform der Erfindung beträgt dieser Abstand nicht mehr als 2 m.

- 5 Der Wirbelschichtreaktor wird bevorzugt als turbulente Wirbelschicht mit einer Leerrohrgeschwindigkeit zwischen 1 und 5 m/s, als hochexpandierte Wirbelschicht mit einer Leerrohrgeschwindigkeit zwischen 0,5 und 2 m/s oder als blasenbildende Wirbelschicht mit einer Leerrohrgeschwindigkeit zwischen 0,01 m/s und 1 m/s ausgeführt. Besonders bevorzugt ausgeführt wird der Wirbelschichtreaktor als blasenbildende Wirbelschicht mit einer Leerrohrgeschwindigkeit zwischen 0,05 und 0,50 m/s, da bei dieser Leerrohrgeschwindigkeit ein besonders günstiger Wärmeübergang und ein besonders günstiger Stoffaustausch erzielt werden kann. Die Leerrohrgeschwindigkeit errechnet sich dabei aus dem Gasvolumenstrom unter Betriebsbedingungen dividiert durch die freie Querschnittsfläche des Reaktors.
- 15 Auch ist der Einsatz von zwei Wärmetauschern denkbar. In diesem Fall befinden sich ein Wärmetauscher im unteren Teil des Wirbelbettes und ein Wärmetauscher im oberen Teil des Wirbelbettes. Dabei wird von den Wärmetauschern unterschiedlich viel Wärme aufgenommen oder abgegeben.
- 20 In einer weiteren Ausführungsform kann die Temperaturverteilung durch die Anordnung eines oder mehrerer Trennböden zwischen jeweils zwei Temperaturzonen erfolgen. Unter Temperaturzone ist dabei ein Bereich mit annähernd konstanter Temperatur in der Wirbelschicht zu verstehen. Als Trennböden eignen sich z.B. Lochböden oder
- 25 Siebböden. An der Position des Trennbodens wird die Durchmischung des Wirbelbettes verschlechtert, so dass das an der Position des Trennbodens weniger Wirbelgranulat mit den aufsteigenden Gasblasen mitgerissen wird und gleichzeitig weniger Wirbelgranulat entgegen der Strömungsrichtung der Gasblasen durch den Trennboden in den Bereich des Wirbelbettes unterhalb des Trennbodens fließt. Hierdurch wird der konvektive Wärmetransport verschlechtert, so dass sich eine deutliche Temperaturgrenze im Bereich des Trennbodens einstellt. Eine weiter verbesserte Trennung der Temperaturzonen im Wirbelbett lässt sich dadurch erreichen, dass ein isolierend wirkender Trennboden eingesetzt wird.
- 30
- 35 In dem erfindungsgemäßen Wirbelschichtreaktor ist in einer weiteren Ausführungsform zur Unterteilung des Wirbelbettes in mindestens zwei Temperaturzonen in mindestens einer Temperaturzone ein Wärmetauscher angeordnet.

In einer weiteren Ausführungsform des Wirbelschichtreaktors sind jeweils zwei Temperaturzonen durch einen Trennboden unterteilt. Der Trennboden ist bevorzugt als Siebboden oder als Lochboden ausgeführt.

- 5 Sofern Trennböden eingesetzt werden, sind diese in einer bevorzugten Ausführungsform als Lochböden mit kegelstumpfförmigen Öffnungen ausgebildet. Dabei ist der Öffnungsdurchmesser auf der Unterseite, d.h. auf der Seite, die angeströmt wird, kleiner als der Öffnungsdurchmesser auf der Oberseite.
- 10 Die Dicke des Trennbodens ist bevorzugt 0,1 bis 20 cm, mehr bevorzugt 1 bis 15 cm und besonders bevorzugt 3 bis 10 cm.

Der Öffnungsdurchmesser auf der Unterseite des Lochbodens ist in einer bevorzugten Ausführungsform kleiner als der mittlere Gasblasendurchmesser. Bevorzugt liegt der Öffnungsdurchmesser auf der Unterseite im Bereich von 0,5 bis 10 cm, mehr bevorzugt im Bereich von 0,7 bis 8 cm und besonders bevorzugt im Bereich von 1 bis 5 cm. Der Öffnungsdurchmesser auf der Oberseite ist bevorzugt im Bereich von 0,5 bis 30 cm, mehr bevorzugt im Bereich von 2 bis 20 cm und besonders bevorzugt im Bereich von 5 bis 15 cm. Der obere Locheindruck wird in einer bevorzugten Ausführungsform so gewählt, dass er größer ist als der mittlere Gasblasendurchmesser.

- 15
  - 20
  - 25
  - 30
- Der Öffnungswinkel, d.h. der Winkel zwischen der Seitenwand der Öffnung und der Mittelachse der Öffnung, ist in einer bevorzugten Ausführungsform so gewählt, dass er größer ist als der Ausdehnungswinkel der Gasblasen, so dass das Wirbelgranulat entgegen der Gasströmung in den Öffnungen an den Seitenflächen entlang fließen kann. Damit das möglich ist und sich keine unbewegte Schüttung auf den Seitenflächen der Öffnungen ausbildet, ist der Öffnungswinkel in einer bevorzugten Ausführungsform ebenfalls größer als der Böschungswinkel der Granulatschüttung. Dabei ist der Böschungswinkel der Winkel, bei dem bei einer losen Schüttung das Schüttgut gerade beginnt abzurutschen.

- 35
  - 40
- Der Öffnungswinkel liegt vorzugsweise im Bereich von 0 bis 60°, mehr bevorzugt im Bereich von 10 bis 50° und besonders bevorzugt im Bereich von 20 bis 40°.
- In einer weiteren Ausführungsform ist der Trennboden zwischen zwei Temperaturzonen aus einem isolierenden Material gefertigt. Dabei ist darauf zu achten, dass das Material, aus welchem der Trennboden gefertigt ist, gegenüber den Temperaturen im Wirbelbett stabil ist. So eignen sich bei Temperaturen in der Wirbelschicht, die oberhalb von 200°C liegen z.B. Keramik oder Glas.

Neben der Fertigung des Trennbodens aus einem isolierenden Material kann der Trennboden in einer weiteren Ausführungsform auch eine thermisch isolierende Schicht enthalten. Hierzu ist der Trennboden vorzugsweise als Hohlkörper ausgebildet, der gegen das Wirbelbett gas- und flüssigkeitsdicht abgeschlossen ist. Der so entstandene Hohlraum kann z.B. evakuiert werden oder unter Umgebungsdruck stehende Luft enthalten. Auch kann der Hohlraum mit einem isolierenden Material, wie Glasfaser oder Steinwolle gefüllt sein. Auch ist es möglich, den Trennboden mit einem Zulauf und einem Ablauf zu versehen und so den Hohlraum von einem Wärmeträger durchströmen zu lassen. Auf diese Weise lässt sich der Trennboden als zusätzlicher Wärmetauscher nutzen.

- Bei Reaktionen, die in Gegenwart eines Katalysators durchgeführt werden, enthält das Wirbelgranulat den Katalysator. Dabei können die einzelnen Granulatkörper jeweils aus Katalysatormaterial bestehen oder an ihrer Oberfläche das Katalysatormaterial enthalten. In einer bevorzugten Ausführungsform umfasst der Katalysator eine Metallkomponente auf einem oxidischen Träger. Metallkomponenten sind beispielsweise Ruthenium- oder Kupferverbindungen. Als oxidischer Träger können Aluminiumoxid, insbesondere  $\gamma$ -Aluminiumxid oder  $\delta$ -Aluminiumoxid, Zirkoniumoxid oder Titanoxid oder Mischungen dieser Oxide eingesetzt werden. Die oxidischen Träger werden vorzugsweise pulvelförmig mit einem mittleren Partikeldurchmesser von 30 bis 150  $\mu\text{m}$ , mehr bevorzugt 40 bis 100  $\mu\text{m}$  und insbesondere 50 bis 80  $\mu\text{m}$  eingesetzt. Der Feinanteil mit einer Partikelgröße <20  $\mu\text{m}$  beträgt bevorzugt weniger als 40 Gew.-%, mehr bevorzugt weniger als 30 Gew.-% und insbesondere weniger als 20 Gew.-%.
- Bei Einsatz des Wirbelschichtreaktors zur Oxidation von Chlorwasserstoff zu Chlor können z.B. die aus GB 1,046,313, DE-A 197 48 299 oder DE-A 197 34 412 bekannten Katalysatoren auf Basis von Ruthenium eingesetzt werden. Weiterhin sind auch die in DE-A 102 44 996 beschriebenen Katalysatoren auf Basis von Gold geeignet, enthaltend auf einem Träger 0,001 bis 30 Gew.-% Gold, 0 bis 3 Gew.-% eines oder mehrerer Erdalkalimetalle, 0 bis 3 Gew.-% eines oder mehrerer Alkalimetalle, 0 bis 10 Gew.-% eines oder mehrerer Seltenerd-Metalle und 0 bis 10 Gew.-% eines oder mehrerer weiterer Metalle, ausgewählt aus der Gruppe bestehend aus Ruthenium, Palladium, Osmium, Iridium, Silber, Kupfer und Rhenium, jeweils bezogen auf das Gesamtgewicht des Katalysators.
- Bevorzugt wird der Katalysator durch Tränkung eines  $\gamma$ -Aluminiumoxid-Pulvers mit einer wässrigen Rutheniumchloridhydrat-Lösung entsprechend der Wasseraufnahme des Trägers getränkt, anschließend bei 100 bis 200°C getrocknet und schließlich bei 400°C unter Luftatmosphäre kalziniert. Der Rutheniumgehalt des Katalysators beträgt bevorzugt 1 bis 5 Gew.-%, insbesondere 1,5 bis 3 Gew.-%.

Bei Einsatz mehrerer Wärmetauscher können diese mit jeweils einem eigenen Zu- bzw. Ablauf versehen sein, in Reihe geschaltet sein oder parallel geschaltet sein. Bei Parallelschaltung der Wärmetauscher haben die einzelnen Wärmetauscher vorzugs-

- 5 weise unterschiedliche Wärmeübertragungsflächen, so dass von den einzelnen Wärmetauschern unterschiedlich viel Wärme aufgenommen bzw. abgegeben wird. Bei Reihenschaltung der Wärmetauscher ist vorzugsweise zwischen die Wärmetauscher eine Pumpe oder eine Drossel geschaltet, so dass der Druck des Wärmeträgers in den einzelnen Wärmetauschern unterschiedlich ist. Insbesondere bei siedenden oder kon-  
10 densierenden Flüssigkeiten als Wärmeträger stellt sich so abhängig vom Druck eine unterschiedliche Temperatur im Wärmetauscher ein.

Um aus dem Wirbelbett Wärme abzuführen, eignet sich z.B. siedendes Wasser, da dieses große Wärmemengen bei konstanter Temperatur aufnehmen kann. Die Tempe-

- 15 ratur des Wassers ändert sich erst, wenn das gesamte Wasser verdampft ist. Die Siedetemperatur ist dabei abhängig vom Druck. Je höher der Druck des siedenden Was-  
sers ist, desto höher ist die Siedetemperatur. Bei hohen Temperaturen im Wirbelbett eignen sich zur Wärmeabfuhr auch Salzschmelzen, deren Temperatur unterhalb der Temperatur im Wirbelbett liegt. Bevorzugt wird siedendes Wasser eingesetzt.

- 20 25 Weitere Wärmeträger, die sowohl zur Wärmezufuhr als auch zur Wärmeabfuhr aus dem Wirbelbett eingesetzt werden können, sind z.B. Thermalöle oder weitere, dem Fachmann bekannte Wärmeträger.

- Figur 1 Im Folgenden wird die Erfindung anhand einer Zeichnung näher beschrieben.

Darin zeigen:

30 Figur 1 eine schematische Darstellung eines erfindungsgemäß ausgebildeten Wir-  
belschichtreaktors mit dem Temperaturverlauf im Reaktor,

Figur 2 eine zweite Ausführungsform eines erfindungsgemäß ausgebildeten Wir-  
belschichtreaktors mit dem Temperaturverlauf im Reaktor,

35 Figur 3 eine Draufsicht auf einen als Lochboden ausgeführten Trennboden mit ke-  
gelstumpfförmigen Öffnungen,

Figur 4 einen Schnitt durch eine Öffnung des Trennbodens aus Figur 3,

Figur 1 zeigt eine schematische Darstellung einer besonders bevorzugten Ausführungsform eines erfindungsgemäß ausgebildeten Wirbelschichtreaktors und des Temperaturverlaufs im Reaktor.

- 5 Ein Wirbelschichtreaktor 1 umfasst eine Windbox 3, einen Gasverteiler 4, ein Wirbelbett 5, eine Endmischungszone 9 und mindestens einen Feststoffabscheider 10. Die Eduktgase werden der Windbox 3 zugeführt. Die Gaszufuhr ist hier mit dem Pfeil 2 gekennzeichnet. Die Gaszufuhr zur Windbox 3 kann dabei, wie hier dargestellt, von unten oder aber seitlich erfolgen. Von der Windbox 3 strömt das Gas über den Gasverteiler 4 in das Wirbelbett 5. Aufgabe des Gasverteilers 4 ist dabei, das Gas gleichmäßig in das Wirbelbett 5 einströmen zu lassen, so dass eine gute Durchmischung von Gas und Feststoff im Wirbelbett 5 erreicht wird. Der Gasverteiler 4 kann dabei ein Lochboden oder ein Boden mit darin verteilten Gasverteilerdüsen sein.
- 10 15 Im Wirbelbett 5 erfolgt die Umsetzung der Eduktgase zum Produkt. Eduktgase sind z.B. Chlorwasserstoff und Sauerstoff zur Herstellung von Chlor.

Bei der in Figur 1 dargestellten Ausführungsform ist das Wirbelbett 5 in eine erste Temperaturzone 6 und eine zweite Temperaturzone 8 unterteilt. Dabei ist in der ersten Temperaturzone 6 kein Wärmetauscher aufgenommen, so dass bei der Durchführung von exothermen Reaktionen im Wirbelschichtreaktor 1 die Temperatur in der ersten Temperaturzone 6 von der durch die Reaktion freigegebenen Wärme abhängt.

20 25 Aufgrund der Durchmischung des Wirbelschichtgranulates erfolgt der Temperaturübergang von der Temperatur der ersten Temperaturzone 6 zur Temperatur der zweiten Temperaturzone 8 über einen größeren Bereich des Wirbelbettes 5.

Ein schärferer Temperaturübergang kann dadurch erreicht werden, dass zwischen der ersten Temperaturzone 6 und der zweiten Temperaturzone 8 ein Trennboden 7 (vgl. Figur 2) angeordnet ist. Der Trennboden ist so gestaltet, dass Gasblasen durch Öffnungen im Trennboden aus der aus der ersten Temperaturzone 6 in die zweite Temperaturzone 8 gelangen.

30 35 Zur Einstellung einer Temperatur in der zweiten Temperaturzone 8, die sich von der Temperatur in der ersten Temperaturzone 6 unterscheidet, ist in der zweiten Temperaturzone 8 ein Wärmetauscher 12 aufgenommen. Der Abstand zwischen dem Gasverteiler 4 und dem Wärmetauscher 12 beträgt in einer bevorzugten Ausführungsform mindestens 50 cm.

## 10

Dem Wärmetauscher 12 wird über einen Wärmeträgerzulauf 13 ein Wärmeträger zugeführt. Über Wärmeträgerverteiler 16 strömt der Wärmeträger in Wärmetauscherrohre 17. Die Wärmetauscherrohre 17 münden in Dampfsammler 14, über die der Wärmeträger einem Wärmeträgerablauf 15 zugeführt wird und aus dem Wärmetauscher 12 abgezogen wird. Über die Anzahl der Wärmetauscherrohre 17 und den Massenstrom des Wärmeträgers lässt sich die vom Wärmetauscher 12 aufzunehmende bzw. abzugebende Wärmemenge einstellen.

Wenn über den Wärmetauscher 12 Wärme aus dem Wirbelbett 5 abgeführt werden soll, eignen sich als Wärmeträger z.B. siedendes Wasser, welches durch die Wärmezufuhr verdampft, Thermalöle oder bei hohen Temperaturen im Wirbelbett 5 Salzschmelzen. Der Wärmeträger hat dabei eine Temperatur, die unterhalb der Temperatur im Wirbelbett 5 liegt.

- 15 Dem Wirbelbett 5 schließt sich die Entmischungszone 9 an. In der Entmischungszone 9 erfolgt eine Trennung von Gas und Feststoff. Um das Produktgas weiter von mitgerissenen Feststoffpartikeln zu reinigen, ist vorzugsweise im oberen Bereich der Entmischungszone 9 mindestens ein Feststoffabscheider 10 angeordnet. Neben der in Figur 1 dargestellten Ausführungsform, bei der der mindestens eine Feststoffabscheider 10 innerhalb des Wirbelschichtreaktors 1 angeordnet ist, kann der mindestens eine Feststoffabscheider 10 auch außerhalb des Wirbelschichtreaktors 1 angeordnet sein. Mit dem Pfeil 11 ist die sich an den mindestens einen Feststoffabscheider 10 anschließende Produktabfuhr gekennzeichnet.
- 20
- 25 Als Feststoffabscheider 10 eignen sich z.B. Zyklone oder Filterkerzen.

Figur 1 zeigt weiterhin den Temperaturverlauf im Wirbelschichtreaktor 1. Dabei bezeichnet die Achse 18 die Höhe des Wirbelschichtreaktors 1 und die Achse 19 die Temperatur. Die gestrichelten Linien in dem Diagramm bezeichnen ein erstes Temperaturniveau 20, ein zweites Temperaturniveau 21 und ein drittes Temperaturniveau 22. Dabei ist die Temperatur des ersten Temperaturniveaus 20 niedriger als die Temperatur des zweiten Temperaturniveaus 21, dessen Temperatur wiederum unterhalb der des dritten Temperaturniveaus 22 liegt. Die Eduktgase werden mit der Edukttemperatur 23 der Windbox 3 des Wirbelschichtreaktors 1 zugeführt. Im Wirbelbett 5 startet die Reaktion. Dabei wird Wärme freigesetzt. Aus diesem Grund steigt die Temperatur im Bereich der ersten Temperaturzone 6 während einer Aufwärmphase 24, bis sie das dritte Temperaturniveau 22 erreicht. Nach Erreichen des dritten Temperaturniveaus 22 stellt sich innerhalb der ersten Temperaturzone 6 aufgrund der Durchmischung des Wirbelbettes 5 eine konstante Temperatur 25 ein.

40

## 11

Bei der in Figur 1 dargestellten bevorzugten Verfahrensvariante wird über den Wärmetauscher 12 Wärme abgeführt. Aus diesem Grund erfolgt in der zweiten Temperaturzone 8 eine Abkühlung. Aufgrund der starken Durchmischung des Wirbelbettes 5 herrscht auch in der zweiten Temperaturzone 8 eine weitgehend konstante Temperatur  
5 27. Die Temperatur 27 liegt dabei auf dem zweiten Temperaturniveau 21. Es ist aber möglich und in der Regel vorteilhaft, dass die Temperatur im Bereich der zweiten Temperaturzone 8 in Strömungsrichtung etwas abfällt. Dies ist insbesondere dann der Fall,  
10 wenn die Reaktionsgeschwindigkeit mit zunehmendem Umsatz im oberen Teil nahe der Oberfläche des Wirbelbettes 5 stark zurückgeht. Der Übergang von der Temperatur 25 in der ersten Temperaturzone 5 auf die Temperatur 27 in der zweiten Temperaturzone 8 erfolgt dabei durch eine Abkühlphase 26.

In Figur 2 ist ein Wirbelschichtreaktor in einer zweiten Ausführungsform mit einer schematischen Darstellung des Temperaturverlaufs dargestellt.

15

Der in Figur 2 dargestellte Wirbelschichtreaktor 1 unterscheidet sich dahingehend von der in Figur 1 dargestellten Ausführungsform, dass in der ersten Temperaturzone 6 ein zweiter Wärmetauscher 28 aufgenommen ist. Der Aufbau und die Funktionsweise des zweiten Wärmetauschers 28 entspricht dabei der des Wärmetauschers 12. Über eine Wärmeträgerzufuhr 29 wird dem zweiten Wärmetauscher 28 ein Wärmeträger zugeführt. Durch Wärmeträgerverteiler 30 strömt der Wärmeträger in Wärmetauscherrohre 31. Die Wärmetauscherrohre 31 münden in Dampfsammler 32, über die der Wärmeträger einem Wärmeträgerablauf 33 zugeführt wird, aus dem zweiten Wärmetauscher 28 abgezogen wird.

25

Unterschiedliche Temperaturen in der ersten Temperaturzone 6 und der zweiten Temperaturzone 8 können durch unterschiedliche Wärmetauscherflächen der Wärmetauscher 12, 28 erreicht werden. So kann beispielsweise der zweite Wärmetauscher 28 weniger Wärmetauscherrohre 31 als der erste Wärmetauscher 12 umfassen. Dies führt dazu, dass die Wärmeübertragungsfläche des zweiten Wärmetauschers 28 sehr viel geringer ist als die Wärmeübertragungsfläche des ersten Wärmetauschers 12. Daraus resultiert, dass über den zweiten Wärmetauscher 28 nicht so viel Wärme abgeführt werden kann wie über den Wärmetauscher 12. Hieraus resultiert eine höhere Temperatur 25 in der ersten Temperaturzone 6 des Wirbelbettes 5.

30  
35

Durch den Einsatz des zweiten Wärmetauschers 28 wird der Bereich der Aufwärmphase 24 bzw. der Abkühlphase 26 verkleinert. Es erfolgt deshalb ein schnellerer Übergang von einem Temperaturniveau zum anderen.

## 12

Die erste Temperaturzone 6 und die zweite Temperaturzone 8 sind durch einen Trennboden 7 unterteilt. Der Trennboden 7 ist so gestaltet, dass die Gasblasen durch Öffnungen im Trennboden 7 in die zweite Temperaturzone 8 gelangen. Durch den Trennboden 7 wird gewährleistet, dass nur ein geringer Anteil an Wirbelschichtgranulat mit dem aufsteigenden Gas mitgerissen wird. Hierdurch wird eine vollständige Durchmischung des Wirbelschichtgranulates aus der ersten Temperaturzone 6 und der zweiten Temperaturzone 8 vermieden. Durch den Trennboden 7 kann somit eine deutlichere Trennung zwischen der ersten Temperaturzone und der zweiten Temperaturzone 8 erfolgen.

5

In einer bevorzugten Ausführungsform wirkt der Trennboden 7 isolierend. Hierzu ist er entweder aus einem isolierenden Material gefertigt oder enthält eine thermisch-isolierende Schicht.

10

In einer bevorzugten Ausführungsform wirkt der Trennboden 7 isolierend. Hierzu ist er entweder aus einem isolierenden Material gefertigt oder enthält eine thermisch-isolierende Schicht.

15

Ein weniger scharfer Übergang zwischen der ersten Temperaturzone 7 und der zweiten Temperaturzone 8 wird erreicht, wenn der Trennboden 7 zwischen der ersten Temperaturzone 6 und der zweiten Temperaturzone 8 weggelassen wird. In diesem Fall erfolgt auch hier aufgrund der Durchmischung des Wirbelschichtgranulats zwischen der ersten Temperaturzone 6 und der zweiten Temperaturzone 8 ein langsamerer Übergang von der Temperatur 25 der ersten Temperaturzone 6 zur Temperatur 27 der zweiten Temperaturzone 8.

20

25

Neben der in den Figuren 1 und 2 dargestellten Ausführungsformen mit zwei Temperaturzonen 6, 8 ist es auch möglich, das Wirbelbett 5 in mehr als zwei Temperaturzonen zu unterteilen. Dabei können sich z.B. jeweils Temperaturzonen mit Wärmetauscher und Temperaturzonen ohne Wärmetauscher abwechseln. Auch ist es möglich, jede Temperaturzone mit einem Wärmetauscher zu versehen. Zwischen den einzelnen Temperaturzonen können Trennböden aufgenommen sein. Wenn ein langsamerer Übergang zwischen den Temperaturen der einzelnen Temperaturzonen erfolgen soll, befinden sich keine Trennböden 7 zwischen den Temperaturzonen.

30

Figur 3 zeigt eine Draufsicht auf eine Ausführungsform eines Trennbodens 7 mit kegelstumpfförmig ausgebildeten Öffnungen 34. Die Öffnungen 34 können dabei jede beliebige, dem Fachmann bekannte Anordnung annehmen. So können z.B. neben der hier dargestellten Anordnung der Öffnungen 34 auf zueinander rechtwinkligen Achsen die Öffnungen 34 auch versetzt angeordnet sein.

35

Ein Schnitt durch eine kegelstumpfförmig ausgebildete Öffnung 34 ist in Figur 4 dargestellt. Die Öffnung 34 hat dabei an der Unterseite 38 des Trennbodens 7 einen ersten Öffnungsdurchmesser 35, der kleiner ist als der zweite Öffnungsdurchmesser 36 der

40

B04/0073

## 13

Öffnung 34 an der Oberseite 39 des Trennbodens 7. Bei der hier dargestellten kegelstumpfförmig ausgebildeten Öffnung 34 nimmt der Öffnungs durchmesser von der Unterseite 38 zur Oberseite 39 des Trennbodens 7 gleichmäßig zu. Die Seitenwand 40 der Öffnung 34 ist dabei in einem Winkel 41 zur Öffnungsachse 37 geneigt. Der Winkel

- 5 41 liegt dabei vorzugsweise im Bereich von 0 bis 60°, mehr bevorzugt im Bereich von 10 bis 50° und insbesondere im Bereich von 20 bis 40°.

Der erste Öffnungs durchmesser 35 ist so gewählt, dass er kleiner ist als der mittlere Gasblasen durchmesser der Gasblasen im Wirbelbett 5. Der erste Öffnungs durchmesser

- 10 35 liegt dabei vorzugsweise im Bereich von 0,5 bis 10 cm, mehr bevorzugt von 0,7 bis 8 cm und insbesondere im Bereich von 1 bis 5 cm. Der zweite Öffnungs durchmesser 36 ist dem gegenüber so gewählt, dass er größer ist als der mittlere Gasblasen durchmesser der Gasblasen im Wirbelbett 5. Der Durchmesser des zweiten Öffnungs durchmesser 36 liegt vorzugsweise im Bereich von 0,5 bis 30 cm, mehr bevorzugt im

- 15 Bereich von 2 bis 20 cm und insbesondere im Bereich von 5 bis 15 cm. In der in Figur 4 dargestellten Ausführungsform ist der Trennboden 7 als Hohlkörper ausgebildet. Dabei wird der Innenraum jeweils durch die Oberseite 39, die Unterseite 38 des Trennbodens 7 und die Seitenwand 40 der Öffnungen 34 begrenzt. Der so entstehende Hohlraum 43 kann z.B. evakuiert sein oder mit Luft unter Umgebungsdruck gefüllt sein.

- 20 Auch kann der Hohlraum 43 jedes weitere dem Fachmann bekannte thermisch isolierende Material enthalten. So eignen sich z.B. Glaswolle oder Mineralwolle.

Die Höhe des Hohlraums 43 ist mit dem Bezugszeichen 42 gekennzeichnet. Die Höhe 42 liegt vorzugsweise im Bereich von 0,1 bis 20 cm, mehr bevorzugt im Bereich von 1

- 25 bis 15 cm und insbesondere im Bereich von 3 bis 10 cm. Das Material für die Wand 44 des Trennbodens 7 ist vorzugsweise so gewählt, dass es gegen die Eduktgase und Produktgase chemisch stabil ist. Die Stärke der Wand 44 liegt vorzugsweise im Bereich von 1 bis 50 mm, mehr bevorzugt im Bereich von 2 bis 30 mm und insbesondere im Bereich von 5 bis 20 mm.

30 Neben der Ausführungsvariante mit einer isolierenden Schicht, wie in Figur 4 dargestellt, kann der Trennboden 7 auch vollständig aus einem isolierenden Material gefertigt sein. Als Materialien eignen sich z.B. Glas oder Keramik.

- 35 Als Trennböden 7 eignen sich alle dem Fachmann bekannten für Gas und Feststoffgranulate durchlässige Böden. So sind neben dem in den Figuren 3 und 4 dargestellten Lochboden z.B. Siebböden besonders geeignet.

Bezugszeichenliste

- 1 1 Wirbelschichtreaktor  
2 2 Eduktzufuhr  
5 3 Windbox  
4 4 Gasverteiler  
5 5 Wirbelbett  
6 6 erste Temperaturzone  
7 7 Trennboden  
10 8 zweite Temperaturzone  
9 9 Entmischungszone  
10 10 Feststoffabscheider  
11 11 Produktabfuhr  
12 12 Wärmetauscher  
15 13 Wärmeträgerzulauf  
14 14 Dampfsammler  
15 15 Wärmeträgerablauf  
16 16 Wärmeträgerverteiler  
17 17 Wärmetauscherrohre  
20 18 Höhe  
19 19 Temperatur  
20 20 erstes Temperaturniveau  
21 21 zweites Temperaturniveau  
23 23 drittes Temperaturniveau  
25 24 Aufwärmphase  
25 25 Temperatur in der ersten Temperaturzone 5  
26 26 Abkühlphase  
27 27 Temperatur in der zweiten Temperaturzone 7  
28 28 zweiter Wärmetauscher  
30 29 Wärmeträgerzufuhr  
30 30 Wärmeträgerverteiler  
31 31 Wärmetauscherrohre  
32 32 Dampfsammler  
33 33 Wärmeträgerablauf  
35 34 Öffnungen  
35 35 erster Öffnungsdurchmesser  
36 36 zweiter Öffnungsdurchmesser  
37 37 Öffnungsachse  
38 38 Unterseite  
40 39 Oberseite

15

- 40 Seitenwand der Öffnung 34
- 41 Öffnungswinkel
- 42 Höhe des Hohlraumes 43
- 43 Hohlraum
- 5 44 Wand

**Patentansprüche**

1. Verfahren zur Durchführung exothermer chemischer Gleichgewichtsreaktionen in einem Wirbelschichtreaktor, wobei im Wirbelbett des Wirbelschichtreaktors entlang der Strömungsrichtung eine Temperaturverteilung vorliegt und die Temperaturdifferenz zwischen der niedrigsten und der höchsten Temperatur mindestens 10 K beträgt.
5. 2. Verfahren nach Anspruch 1, dadurch gekennzeichnet, dass die Temperatur innerhalb des Wirbelbettes von einem absoluten Temperaturmaximum entlang der Strömungsrichtung zur Oberfläche des Wirbelbettes hin abfällt.
10. 3. Verfahren nach einem der Ansprüche 1 oder 2, dadurch gekennzeichnet, dass die Temperatur innerhalb des Wirbelbettes von einem absoluten Temperaturmaximum im Wirbelbett entlang der Strömungsrichtung zur Oberfläche des Wirbelbettes und zum Gasverteiler hin abfällt.
15. 4. Verfahren nach einem der Ansprüche 1 bis 3, dadurch gekennzeichnet, dass der Abstand zwischen dem absoluten Temperaturmaximum und dem Gasverteiler geringer ist als der Abstand zwischen dem absoluten Temperaturmaximum und der Oberfläche des Wirbelbettes.
20. 5. Verfahren nach einem der Ansprüche 1 bis 4, dadurch gekennzeichnet, dass die Temperatur der dem Wirbelschichtreaktor zugeführten Reaktionsgase unterhalb der niedrigsten im Wirbelbett vorliegenden Temperatur liegt.
25. 6. Verfahren nach einem der Ansprüche 1 bis 5, dadurch gekennzeichnet, dass die Temperaturverteilung durch Wärmeübertragung an mindestens einen Wärmetauscher innerhalb des Wirbelbettes erzeugt wird.
30. 7. Verfahren nach einem der Ansprüche 1 bis 6, dadurch gekennzeichnet, dass die chemische Reaktion die Herstellung von Chlor aus Chlorwasserstoff und Sauerstoff ist.
35. 8. Verfahren nach einem der Ansprüche 1 bis 7, dadurch gekennzeichnet, dass das Wirbelbett einen Katalysator enthält, der eine Metallkomponente auf einem oxidi schen Träger umfasst.

9. Verfahren nach Anspruch 8, dadurch gekennzeichnet, dass der Katalysator eine Rutheniumverbindung enthält.
10. Wirbelschichtreaktor zur Durchführung des Verfahrens nach einem der Ansprüche 1 bis 9 in einem Wirbelbett (5), dem Reaktionsgase über einen Gasverteiler (4) zugeführt werden, wobei zur Steuerung der Temperaturverteilung innerhalb des Wirbelbettes (5) mindestens ein Wärmetauscher (12, 28) im Wirbelbett (5) angeordnet ist.
- 10 11. Wirbelschichtreaktor nach Anspruch 10, dadurch gekennzeichnet, dass der Abstand zwischen dem Gasverteiler (4) und dem nächstgelegenen Wärmetauscher (12) mindestens 50 cm beträgt.

## Wirbelschichtverfahren mit inhomogener Temperaturverteilung

**Zusammenfassung**

5

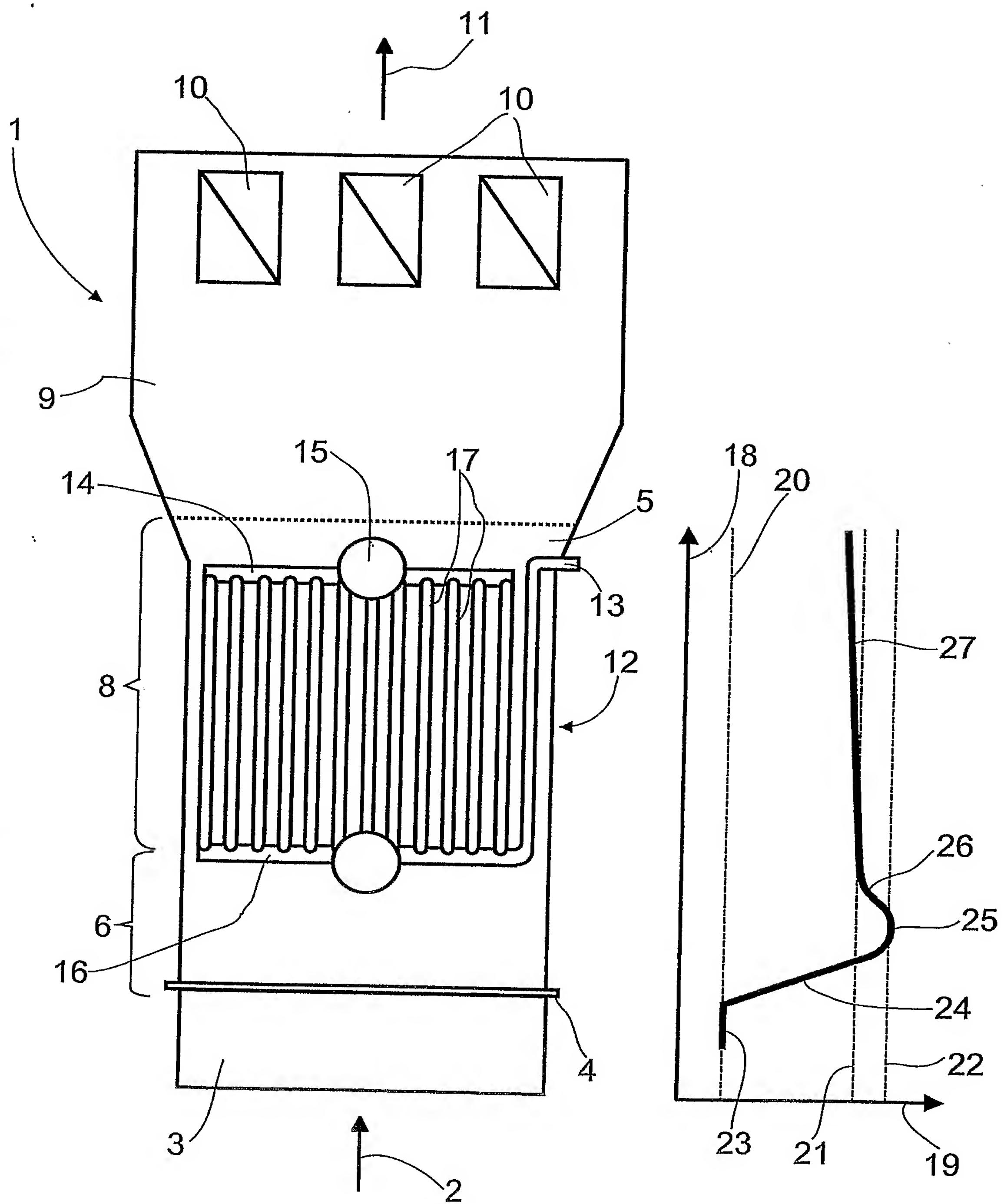
Die Erfindung betrifft ein Verfahren zur Durchführung exothermer chemischer Gleichgewichtsreaktionen in einem Wirbelschichtreaktor, wobei im Wirbelbett des Wirbelschichtreaktors eine Temperaturverteilung vorliegt und die Temperaturdifferenz zwischen der niedrigsten und der höchsten Temperatur mindestens 10 K beträgt. Weiterhin betrifft die Erfindung einen Wirbelschichtreaktor zur Durchführung chemischer Reaktionen in einem Wirbelbett (5), wobei zur Steuerung der Temperaturverteilung mindestens ein Wärmetauscher (12, 28) im Wirbelbett (5) angeordnet ist.

10

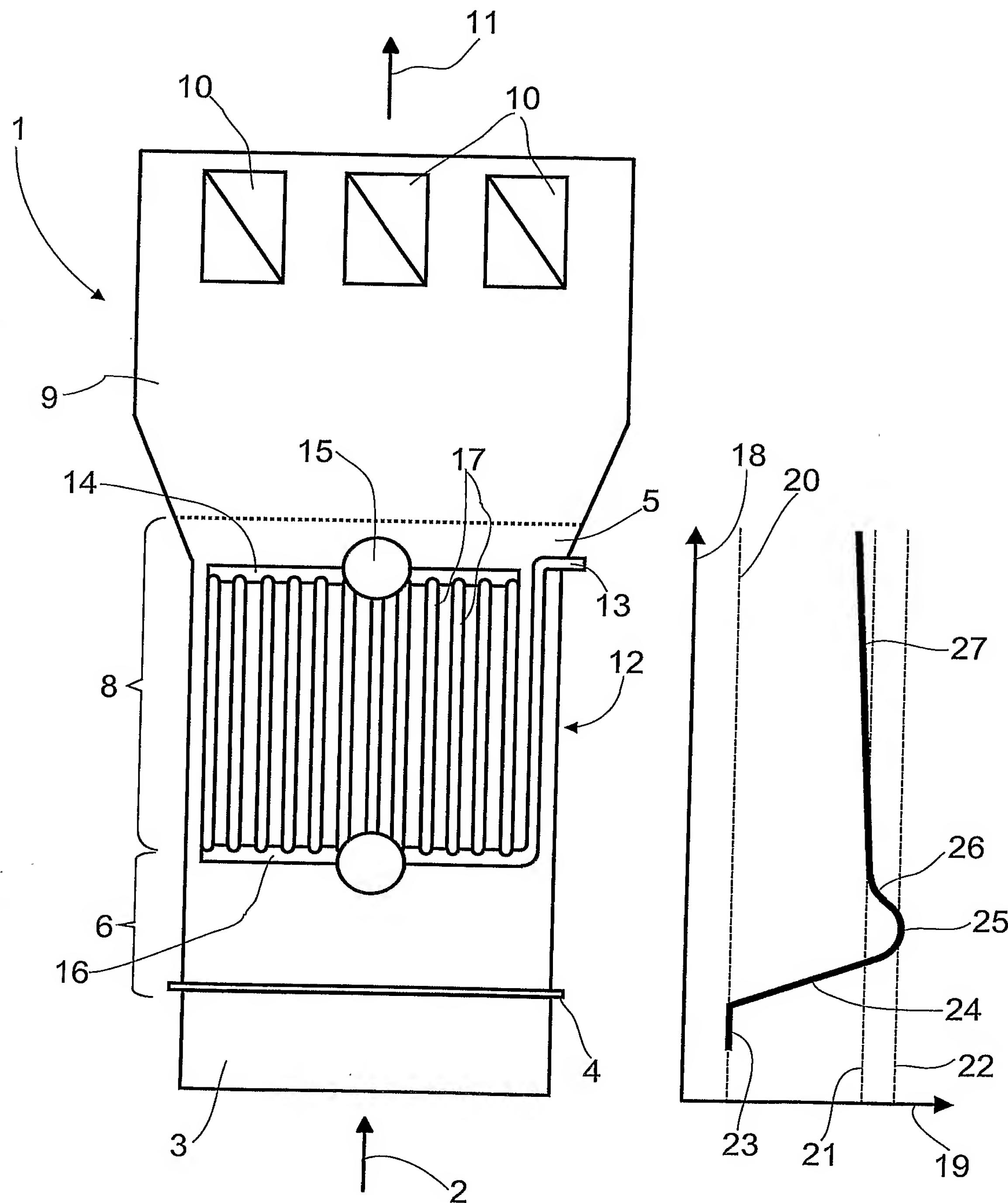
15

(Figur 1)

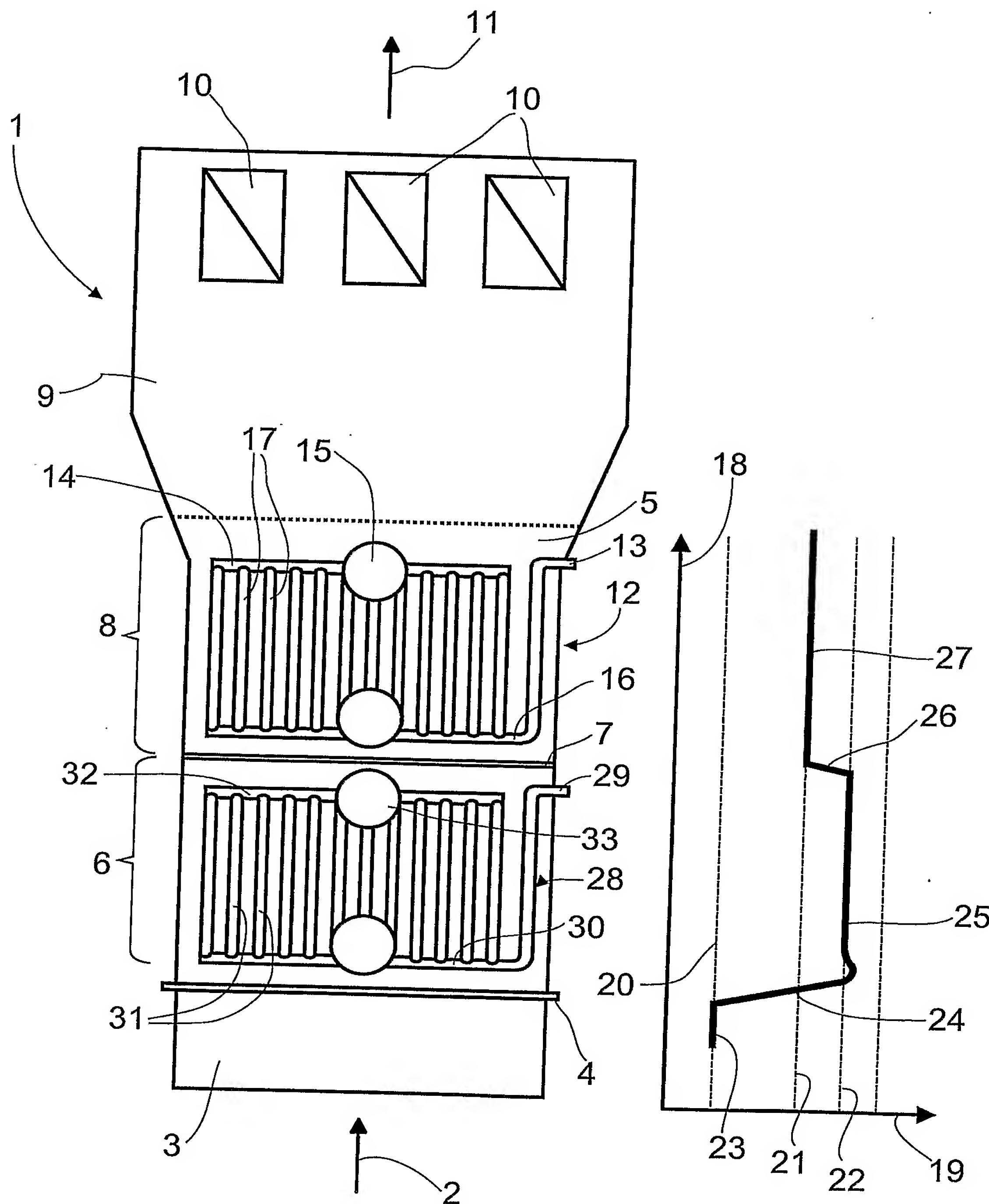
**FIG. 1**



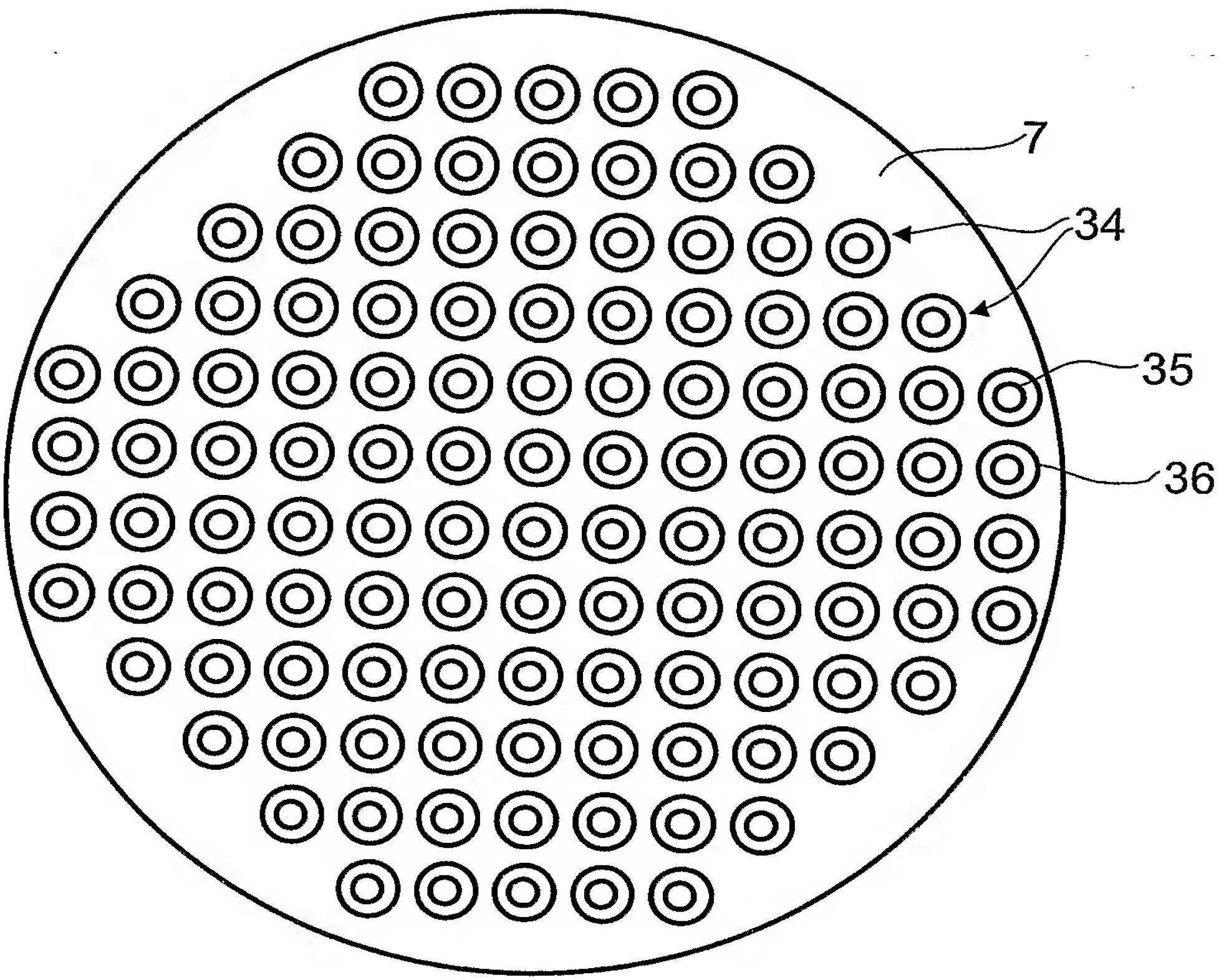
**FIG.1**



**FIG.2**



**FIG.3**



**FIG.4**

